

Pražnjači akumulatorskih baterija – efikasna metoda za potpuno pražnjenje baterija kontrolisanom strujom

Nenad Jovančić
Odjeljenje za razvoj elektronskih sistema
KV Team d.o.o, Sarajevo
Bosna i Hercegovina
nenad.j@kvteam.com

Sanja Medar
Rukovodilac odjeljenja za kvalitet proizvoda
IBEKO Power AB, Štokholm
Švedska
sanja@dv-power.com

Sažetak — Baterije se najčešće koriste kod potrošača koji u svakom trenutku trebaju napajanje – elementi kontrole i zaštite vitalnih dijelova elektroenergetske mreže, serveri velikih bankarskih sistema, medicinska oprema u urgentnim odjeljenjima i mnogi drugi. Da bi se očuvala pouzdanost baterija, neophodan je stalni nadzor i periodično ispitivanje. Između ostalog, periodično se kontrolisano prazni s ciljem određivanja raspoložive energije u njima. Takođe, na kraju životnog vijeka baterije, poželjna je njena reciklaža. Kroz istoriju, koristili su se različiti tipovi pražnjača. U novije vrijeme egzistiraju dva tipa - oni koji energiju baterije troše na pasivne terete i oni koji energiju vraćaju u EE mrežu. Istraživanja koja se provode od strane određenih proizvođača Li-ion baterija pokazuju da se postiže veća efikasnost reciklaže ove vrste baterija ako je stepen zaostale energije u njima manji – posebno u slučaju potpunog pražnjenja. Zbog svoje konstrukcije, klasični pražnjači ne mogu obavljati toliko duboka pražnjenja kontrolisanom strujom. U ovom radu opisana je metoda i predstavljen sistem/uređaj koji može da potpuno da prazni bateriju kontrolisanom strujom naponskog nivoa do 800 Vdc.

Ključne riječi – baterija, pražnjači baterija, potpuno pražnjenje, reciklaža baterija (battery, dischargers, full discharging, recycling)

I. UVOD

U pogledu mogućnosti dopunjavanja, baterije se dijele na primarne (nedopunjive) i sekundarne (dopunjive). I jedne i druge se široko primjenjuju. Pored pražnjenja u redovnoj eksploataciji, kod sekundarnih baterija javlja se potreba i za periodičnim kontrolisanim pražnjenjem s ciljem određivanja opšteg stanja i parametara baterije. U skladu sa standardima¹ koji definišu uslove pražnjenja baterija, najpoželjnije je desetosatno pražnjenja strujama 0,1C. To znači, ako je nazivni kapacitet npr. C=1200 Ah, baterija treba da se prazni strujom od 120 A u trajanju 10 časova.

S druge strane, trenutni zahtjevi o bezbjednosti avio saobraćaja postavljaju uslove za transport uređaja koji u sebi sadrže Li-ion i/ili Li-Po baterije. Između ostalog, ograničenja se odnose na količinu energije sadržane u bateriji - ako nazivni kapacitet baterije prelazi dozvoljeni nivo, bateriju je, prije transporta, potrebno prazniti do nivoa koji je dozvoljen. [1]

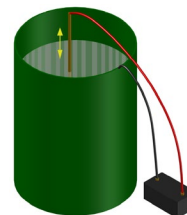
Na kraju, po isteku životnog vijeka baterije, potrebno je obezbjediti adekvatno zbrinjavanje i/ili reciklažu. Postoje studije koje pokazuju da je proces reciklaže Li-ion baterija efikasniji ukoliko je zaostala energija u njima manja. [2] Zbog toga je i u ovom slučaju neophodno kontrolisano pražnjenje baterija.

II. PREGLED KONSTRUKCIJA I OSNOVNIH KARAKTERISTIKA PRAŽNJAČA BATERIJA

Na osnovu prethodno navedenog, očigledna je potreba za sistemom/uređajem koji može kontrolisano prazniti baterije različitog naponskog nivoa i kapaciteta. Najčešće se ovakvi aparati nazivaju **pražnjačima baterija**. Obzirom na činjenicu da postoje različiti tipovi baterija koji se već dugo i intenzivno koriste, razvijen je i veliki broj različitih pražnjača.

A. Istorija konstrukcije pražnjača baterija

Prvi primitivni pražnjači bili su načinjenji od metalnog kazana (jedna elektroda) u koji je sipan slani rastvor i bakarne šipke (druga elektroda) koja se potapala u njega. Nivo struje pražnjenja regulisao se dubinom potapanja bakarne šipke u slani rastvor. Energija iz baterije se tom prilikom oslobađala u toplotu - zagrijavala je slani rastvor. Ovaj tip pražnjača imao je mnogo nedostataka: zbog isparavanja slanog rastvora tokom procesa pražnjenja bilo je potrebno dosipati novu količinu rastvora, proces elektrolize izazivao je eroziju bakarne elektrode, neophodno je bilo stalno prisustvo operatera jer je on praktično nadzirao kompletan proces, prije svega regulaciju struje pražnjenja.



Slika 1. 3D replika primitivnog pražnjača baterija

¹ U zavisnosti od tipa (tehnologije) baterija, postoje i različite preporuke i standardi, kao što su IEEE 450-2010 (SLA baterije), IEEE 1188-2005 (VRLA

baterije), IEEE 1106-2015 (NiCd baterije), IEC 60896-11/22 (VRLA baterije), koji definišu načine i uslove pražnjenja.

Malo napredniju generaciju čine pražnjači u vidu otporničkih dekada. Regulacija struje pražnjenja je ručna – izborom grupe otpornika pomoću prekidača/kontaktera (sl. 2).

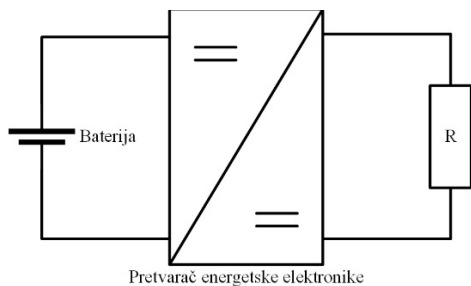


Slika 2. Otpornička dekada kao pražnjač baterija

Parametri baterije (napon i struja) tokom procesa pražnjenja prate se preko analognih instrumenata. Kod ovog pražnjača lista nedostataka je nešto kraća: i dalje se proces pražnjenja vodi ručno – operater prati struju pražnjenja i podešava vrijednost otporničke dekade, aparati su podložni otkazima – zbog čestog prekidanja DC struje dolazi do oštećenja kontakata prekidača, aparati su glomazni i teški – za snagu od 10 kW aparat je težak blizu 100 kg.

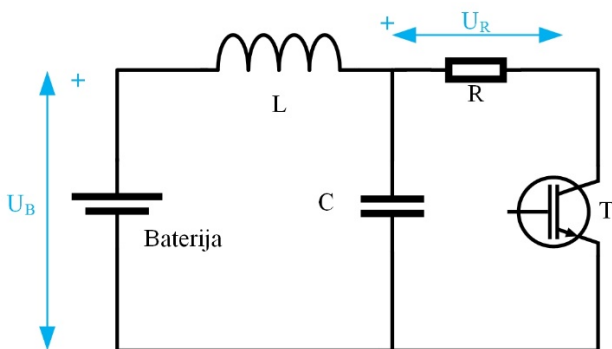
B. Savremeniji pražnjači – bez rekuperacije energije

Sa razvojem poluprovodničkih prekidača, razvili su se i savremeniji pražnjači baterija. Prvi od njih predstavljaju kombinaciju pretvarača energetske elektronike i grupe snažnih otpornika (sl. 3).



Slika 3. Blok šema modernih pražnjača baterija

Iako su nastali početkom 90-ih godina prošlog vijeka i dalje se u značajnoj mjeri proizvode i koriste. Najpogodnija topologija pretvarača energetske elektronike jeste spuštač napona. U praksi se koriste modifikovane šeme kao sa (Sl. 4).



Slika 4. Pojednostavljena el. šema pražnjača

Na ulazu pretvarača nalazi se LC filter koji se dimenzioniše tako da struja baterije bude neprekidna, odnosno ograničenog ripla. Pogodnim upravljanjem tranzistorom T (širinsko-impulsnom modulacijom) definiše se nivo napona U_R na otporniku R, samim tim i struja pražnjenja baterije. Otpornik R predstavlja grupu otpornih traka vezanih tako da obrazuju rešetku kroz koju struji vazduh koji je hladi, jer se energija iz baterije troši na zagrijavanje ove rešetke.

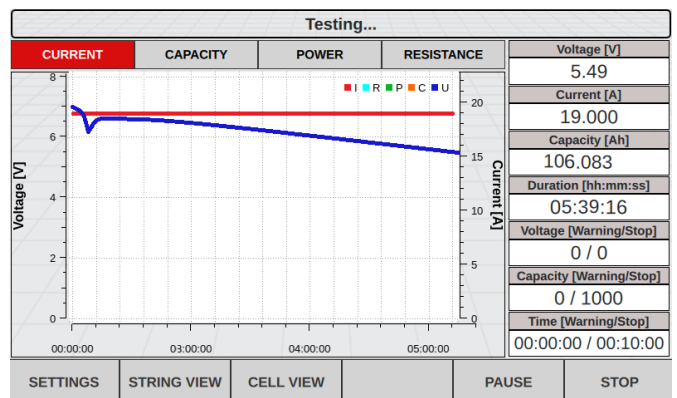
Ovaj tip pražnjača rješava mnoge nedostatke svojih prethodnika. Prije svega što se preciznije prate parametri pražnjenja, test se vodi automatski, pa se ne zahtjeva prisustvo operatera.

Proizvođača ove vrste pražnjača ima nekoliko. Među najpoznatijim su pražnjači BLU serije švedskog proizvođača DV Power (Sl. 5). Svi modeli su modernog dizajna, izrađeni u skladu sa normama o elektromagnetskoj kompatibilnosti EMC (od engl. *ElectroMagnetic Compatibility*) i sigurnosti pri korištenju LVD (od eng. *Low Voltage Directive*) i kao takvi čine veoma robusne i pouzdane uređaje za pražnjenje baterija.



Slika 5. Pražnjač BLU-C serije švedskog proizvođača DV Power [3]

U ponudi je nekoliko različitih modela, prilagođenih naponskim nivoima baterija i snagama pražnjenja. Tako se nude modeli sa 12 kW, 20 kW, 30 kW i 40 kW snage pražnjenja, koji pokrivaju širok opseg napona baterija, od 6 Vdc do 800 Vdc. U pogledu dimenzija veoma su kompaktni i teže od 10 kg do 20 kg, što ih svrstava u najlakše na tržištu. BLU-C serija aparata omogućava praćenje napona i temperature pojedinih ćelija u realnom vremenu, što je veoma korisno kod baterija sa velikim brojem ćelija. Prikaz toka pražnjenja u realnom vremenu na uređaju BLU-C serije, prikazan je na slici 6. [3]



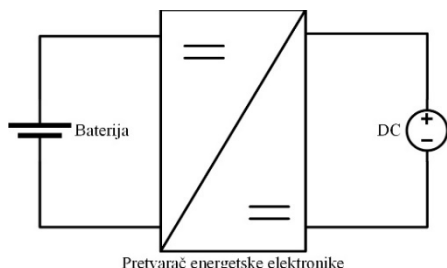
Slika 6. BLU-C Prikaz parametara pražnjenja baterije u realnom vremenu

C. Pražnjači baterija sa rekuperacijom energije

U ambijentu borbe za očuvanje životne sredine, gdje se, između ostalog, sve više vodi računa i o efikasnosti procesa, pa tako i o načinima pražnjenja baterija, javila se potreba za razvojem pražnjača koji energiju baterije ne troše bespovratno, nego je vraćaju u neki drugi proces ili elektroenergetsku mrežu (EE) – pražnjači sa rekuperacijom energije.

1) Pražnjači sa rekuperacijom energije u DC mrežu

Struktura ovih pražnjača veoma je slična onoj sa slike 3 – baterija je ovog puta preko pretvarača energetske elektronike, umjesto na pasivni potrošač (otpornik), vezana na DC mrežu sa koje se dalje napajaju različiti DC potrošači (Sl. 7).

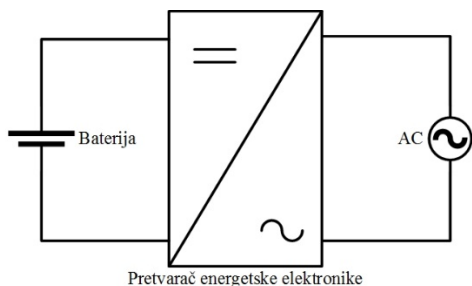


Slika 7. Blok šema pražnjača sa rekuperacijom energije u DC mrežu

Pretvarač energetske elektronike može biti podizač ili spuštač napona. Najčešće je podizač-spuštač, jer primjena i priroda procesa pražnjenja baterija je takva da naponski nivoi baterije i DC mreže mogu da se nađu u bilo kom odnosu. Ovaj tip pražnjača vrlo često koriste sami proizvođači baterija za potrebe procesa formiranja baterije tako što istovremeno prazne jedne i pune druge baterije, što rezultuje uštedu energije i vremena, samim tim i novca. [4] Snaga ovih pražnjača ograničena je snagom DC mreže. Naime, u slučaju da DC mreža nije dovoljno snažna da potroši energiju iz baterije, može doći do porasta napona DC mreže, pa se tada mora redukovati snaga ili potpuno zaustaviti proces pražnjenja.

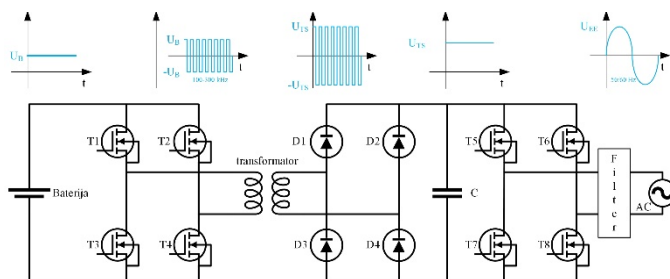
2) Pražnjači sa rekuperacijom energije u EE mrežu

Najsloženiju strukturu pražnjača imaju oni koji energiju iz baterije vraćaju u EE mrežu (Sl. 8). Složenost se ogleda u broju pretvarača energetske elektronike i zahtjevnim algoritmima upravljanja.



Slika 8. Blok šema pražnjača sa rekuperacijom energije u EE mrežu

Postoje različita rješenja i topologije koje obezbjeđuju potreban transfer energije između baterije i EE mreže. Na Sl. 9 prikazana je uprošćena šema jedne od konfiguracija pražnjača koji energiju baterije vraćaju u jednofaznu EE mrežu.



Slika 9. Pojednostavljena el. šema pražnjača sa rekuperacijom energije u jednofaznu EE mrežu

Na putu od baterije do EE mreže nalazi se veliki broj poluprovodničkih prekidača i elemenata uopšte. Prvi od pretvarača je punomosni inverter kojeg čine 4 tranzistora (T1-T4). Na njegovom izlazu vezan je transformator – riječ je o visokofrekventnom (VF) transformatoru (par stotina kHz). Uloga mu je da načini galvansku izolaciju između baterije i EE mreže. Pored toga, zbog činjenice da nazivni napon baterije može biti različitog nivoa² i da se on mijenja (opada) tokom procesa pražnjenja, transformator pomaže u regulaciji (podizanju) napona koji se prosljeđuje dalje ka EE mreži. U nastavku, na izlazu VF transformatora, nalazi se ispravljač. Prikazan je diodni, mada može biti i sinhroni ispravljač. Na kraju, jednofazni inverter prema EE mreži čine 4 tranzistora (T5 – T8) i filter. Jednofazna rješenja ograničena su snagom jednofazne distributivne mreže i najčešće se rade za snage do 3 kW. Rješenja sa trofaznim inverterom ostvaruju mnogo veće snage pražnjenja – par desetina kW.

Pitanjem uslova o priključenju i radu uređaja na distributivnu EE mrežu, u ulozu izvora energije, što predstavlja ova vrsta pražnjača, bave se različiti standardi (EN 50178, EN 50438). Kod projektovanja ovih sistema, ključno je obezbjeđiti nekoliko stvari: u slučaju da poremećaj dođe sa strane mreže, uređaj mora ostati bezbjedan za onog ko njime rukuje, kvar na uređaju ne smije uzrokovati probleme na EE mreži, struja (energija) koju uređaj vraća u mrežu mora biti definisanog kvaliteta.

Proizvođača ovakvih tipova pražnjača nema mnogo. Na tržištu se mogu naći pražnjači evropskih proizvođača kao što su Regatron [5] (Švajcarska), EA Elektro-Automatik [6] (Njemačka) i DV Power [3] (Švedska). Svaki od njih nudi rješenja koja su kompaktna i modularna, snage pojedinačnih modula od 10 kW do 60 kW, koji ostvaruju efikasnot konverzije veću od 95%, nude uobičajene modove pražnjenja - konstantna struja, konstantna snaga, konstantan otpor, konstantan napon kao i unaprijed zadati profili opterećenja. Namjenjeni su za testiranje različitih tipova (olovne, Li-ion, NiCd, NiMH) sekundarnih baterija kao i baterija u automobilskoj industriji u širokom opsegu napona i kapaciteta (snaga).

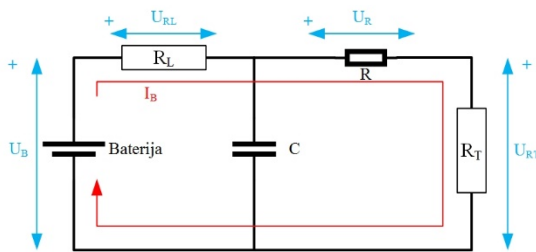
² najčešći nazivni naponi baterija su 12 Vdc, 24 Vdc, 48 Vdc, 110 Vdc, 220 Vdc i 480 Vdc

III. METODA I UREĐAJ ZA POTPUNO PRAŽNJENJE BATERIJA

Ranije u tekstu je navedeno da određena istraživanja iz oblasti proizvodnje i reciklaže baterija pokazuju da se efikasnost procesa reciklaže Li-ion baterija povećava ako je nivo zaostale energije u njima manji. Istraživanja idu do te mjere da bateriju kontrolisano prazne do nivoa potpune ispražnjenosti, tj. dok napon na bateriji ne postane 0 V. [2]

A. Metoda

Jedan od načina da se baterija potpuno isprazni jeste da ona bude vezana na pražnjač bez rekuperacije. Pored toga što energiju „bacamo u vazduh“, veći problem se javlja kada napon baterije počne da se približava nuli – tada pretvarač energetske elektronike ima sve manje resursa da kontroliše struju pražnjenja. U jednom trenutku struja prestaje biti kontrolisana, tj. počne da zavisi od napona baterije. To se može pokazati analizom el. šeme sa Sl. 10, koja predstavlja šemu pražnjača bez rekuperacije energije (Sl. 4) u slučaju kada je tranzistor T trajno uključen.



Slika 10. El. šema pražnjača bez rekuperacije za slučaj kad je tranzistor trajno uključen

Za kolo sa Sl. 10 vlada naponska ravnoteža koje je iskazana jednačinom (1)

$$U_B = U_{RL} + U_R + U_{RT} \quad (1)$$

odnosno, struja pražnjenja se računa preko (2):

$$I_B = U_B / (R_L + R + R_T) \quad (2)$$

Dakle, smanjenjem napona baterije U_B dolazi i do pada struje pražnjenja, što narušava (usporava) pražnjenje.

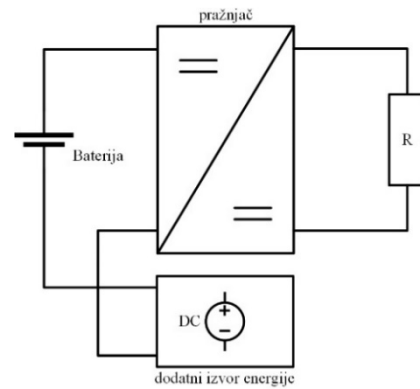
Pražnjači sa rekuperacijom, zbog konačne radne oblasti pretvarača energetske elektronike, ne mogu u potpunosti prazniti baterije bilo kog naponskog nivoa. Na osnovu ove činjenice, dolazi se do zaključka da je za efikasno pražnjenje potreban dodatni izvor energije koji će osigurati da pretvarač energetske elektronike kontroliše struju pražnjenja u punom opsegu napona baterije (3).

$$0 < U_B < U_{Bmax} \quad (3)$$

S tim u vezi, na slici Sl. 11 predstavljeno je rješenje koje omogućava potpuno pražnjenje baterija različitog naponskog nivoa, kontrolisanom strujom. Za razliku od dosadašnjih konfiguracija pražnjača, koji struju pražnjenja formiraju isključivo od energije iz baterije, prikazano rješenje, u momentima kada je napon baterije ispod kritične vrijednosti U_{BK} (4), kod predloženog rješenja struju pražnjenja održava dodatni izvor energije.

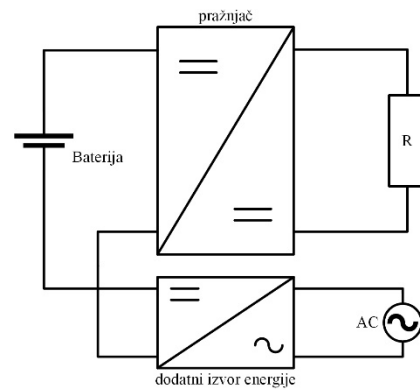
$$U_{BK} = (R_L + R_T + R) \cdot I_{Bkonst} \quad (4)$$

Rješenje je ilustrovano na primjeru pražnjača bez rekuperacije energije, ali se može primjeniti i na sve druge tipove.



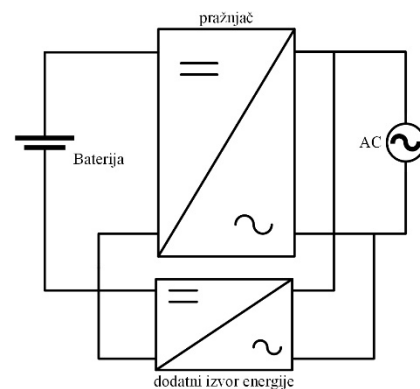
Slika 11. Sistem za potpuno pražnjenje baterija

Poredeći snagu pražnjenja na početku, kada je napon u okolini nominalne vrijednosti, i na kraju, kada je napon u okolini nule, zaključuje se da nije potrebna velika snaga dodatnog izvora energije. Dodatni izvor energije može se obezbjediti na nekoliko načina. Recimo, za slučaj pražnjača bez rekuperacije, dodatni izvor energije je EE mreža (Sl. 12).



Slika 12. Dodatni izvor energije dobijen iz EE mreže

Energija se kod pražnjača sa rekuperacijom vraća u EE mrežu, s toga se u ovom slučaju energija za napajanje dodatnog izvora, indirektno, dobija iz same baterije koja se prazni (Sl. 13).



Slika 13. Dodatni izvor energije dobijen iz baterije koja se prazni

Predloženo rješenje je originalano i rezultat je rada odjeljenja za razvoj uređaja energetske elektronike švedskog proizvođača DV Power. Rješenje je u patentnoj proceduri kod američkog zavoda za patente (*United States Patent and Trademark Office*), pod brojem **62/942,769**.

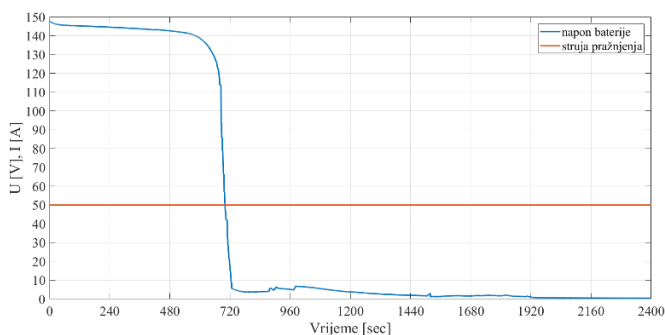
B. Uređaj za potpuno pražnjenje baterije kontrolisanom strujom

Na bazi predloženog rješenja, kompanija DV Power razvila je sistem za potpuno pražnjenje baterija nazivnog napona od 6 Vdc do 500 Vdc, maksimalnom strujom do 60 A. Sistem se sastoji od klasičnog pražnjača (BLU serija) i uređaja ZVD (od engl. *Zero Voltage Discharger*).



Slika 14. Prototip ZVD serije pražnjača (DV Power, Švedska)

Dok je napon baterije u uobičajenim granicama, pražnjenje se odvija ustaljenom procedurom – energijom baterije upravlja pretvarač energetske elektronike kontrolišući struju (snagu ili otpor) pražnjenja. Sve vrijeme u seriji sa baterijom vezan je i dodatni izvor energije. Dimenzionisan je tako da pražnjaču, kada je napon baterije u okolini nule, obezbjedi dovoljno resursa (napona) kako bi se struja mogla kontrolisati. Istraživanja [2] pokazuju da za potpuno pražnjenje nije dovoljno samo dostići nulti napon baterije, nego se potrebno tu i zadržati određeno vrijeme. Zbog toga je unutar ZVD-a ugrađen mehanizam koji, u trenutku kada napon baterije padne na nulu, kratko spaja bateriju i na taj način određeno vrijeme napon na njoj održava na nuli. Iako je baterija kratko spojena, na račun zaostale energije u njoj i konačne provodnosti spojnih provodnika i dalje postoji određena struja curenja. Prema [2], iskustveno se pokazuje da je proces potpunog pražnjenja završen kada struja kratkog spoja padne na nulu. Na Sl. 15 prikazani su talasni oblici napona i struje pražnjenja Li-ion baterije pomoću sistema BLU + ZVD gdje se pokazuje da je sve vrijeme pražnjenja struja konstantna (50 A), iako se napon baterije mijenja od 147 V do 0 V.



Slika 15. Proces potpunog pražnjenja Li-ion baterije

IV. ZAKLJUČAK

Akumulatorske baterije predstavljaju važan element sistema napajanja. Naročito je bitna njihova pouzdanost kod potrošača koji ni u jednom momentu ne smiju ostati bez napajanja. Postoje različite metode za određivanje stepena pouzdanosti baterija. Između ostalog, periodično se kontrolisano prazne. Takođe, po isteku životnog vijeka, vrši se reciklaža baterija. Zadnja istraživanja iz oblasti reciklaže Li-ion baterija pokazuju da manje zaostale energije u bateriji omogućava efikasniji proces reciklaže. Za potrebe pražnjenja baterija koriste se namjenski dizajnirani uređaji – pražnjači baterija. Obzirom da se klasični pražnjači, zbog svoje konstrukcije, ne mogu koristiti za duboko (potpuno) pražnjenje baterija, u ovom radu prikazano je rješenje koje prazni baterije kontrolisanom strujom i na taj način omogućava proces potpunog pražnjenja. Razvijeno je u saradnji sa švedskom kompanijom DV Power koja se, između ostalog, bavi i proizvodnjom pražnjača baterija. Rješenje je primjenjivo kod pražnjača sa i bez rekuperacije. Predstavljene su osnovne karakteristike realizovanog sistema, kao i rezultati pražnjenja koji su dobijeni na primjeru Li-ion baterije.

LITERATURA

- [1] <https://www.iata.org/en/publications/dgr>, decembar 2019
- [2] I. Karlsson, J. Lindström, "Lithium-ion Battery recycling from a manufacturing strategy perspective", Master thesis, KTH Industrial Engineering and Management, Sweden, Stockholm, jun 2018.
- [3] <https://www.dv-power.com/product/battery-capacity-testers/>, dec. 2019
- [4] <https://batteryuniversity.com/>, jan. 2009
- [5] <https://www.regatron.com/programmable-power-supplies/en/>, jan. 2019.
- [6] <https://elektroautomatik.com/shop/en/>, jan. 2019.

ABSTRACT

Abstract - Batteries are most commonly used for consumers that need power at all times – elements for control and protection of vital parts of the power grid, servers in large banking systems, medical equipment used in emergency departments and many others. In order to maintain the reliability of the batteries, they are constantly monitored and periodically inspected. Among other things, controlled discharge is performed to determine the amount of available battery energy. Throughout history, different types of battery dischargers have been used. More recently, two types are used - conventional that dissipate battery energy on passive loads and those that perform energy recuperation. Research done by certain Li-Ion battery manufacturers show that more efficient recycling of this type of batteries is achieved if the level of the residual battery energy is lower – especially if full discharge is performed. However, because of their construction, conventional discharge systems cannot perform such deep discharge maintaining the constant current. This paper describes the method and introduces the system / device capable of fully discharging batteries up to 800 Vdc.

BATTERY DISCHARGERS – AN EFFECTIVE METHOD FOR THE CURRENT-CONTROLLED FULLY DISCHARGING PROCESS

Nenad Jovančić, Sanja Medar

